

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПОТОКА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИЛ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФИЛЬТРАЦИИ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

*Доктора техн. наук ТУМИЛОВИЧ М. В., ПИЛИНЕВИЧ Л. П.,
канд. техн. наук ГАЛКИН А. Е.*

*Белорусский национальный технический университет,
Институт порошковой металлургии НАН Беларуси*

В результате деятельности человека и под воздействием природных процессов происходит интенсивное загрязнение окружающей среды, в том числе воды и воздуха, которое приводит к нежелательному изменению их состава в результате поступления в него различных газов, водяного пара и высокодисперсных частиц аэрозолей. Производственная деятельность многих отраслей промышленности связана с выделением аэрозолей и последующим улавливанием тонких частиц. Такие процессы имеют место, например, при производстве наполнителей и полимеров, порошкообразных пигментов и химикатов, технического углерода, химических средств защиты растений, извести и цемента, пылевидного кварца и асбеста, при плавке цветных и редких металлов.

В связи с повышением требований к качеству очистки газов быстро расширяется применение фильтровальных аппаратов, в которых пыль отделяется путем пропускания газа (воздуха) через пористые перегородки из различных фильтрующих материалов. Фильтры используют чаще, чем другие устройства, в случаях, когда концентрация пыли на выходе из аппарата не превышает 50 мг/м^3 либо если требуется улавливать ценные порошкообразные продукты.

Наиболее серьезную гигиеническую опасность представляют небольшие аэрозольные частицы, обладающие малой скоростью витания, так как они вызывают заболевания органов дыхания, зрения, кожных покровов и внутренних органов человека.

В связи с этим разработка новых фильтрующих устройств, обладающих повышенной эффективностью очистки аэрозольных частиц, является важной и актуальной задачей, имеющей большое научное и практическое значение.

Цель настоящей работы – теоретическое и экспериментальное исследование основных закономерностей процесса очистки воздуха от ультрадисперсных аэрозолей в условиях действия электрических сил при различных скоростях потока.

Эффективность любого процесса фильтрации определяется гидродинамическими условиями и структурными параметрами фильтрующего материала, а также возможностью и степенью воздействия дополнительных внешних сил, приводящих к изменению классических условий фильтрации газов.

Теоретические и экспериментальные исследования процесса фильтрации аэрозолей волокнистыми фильтрами [1–5] показывают, что при обычных условиях эффективность улавливания аэрозольных частиц в основном зависит от скорости потока и размера волокон фильтра – чем выше скорость и больше диаметр волокон, тем ниже эффективность фильтрации. Увеличение плотности упаковки фильтрующего материала оказывает не столь существенное влияние на степень улавливания частиц, но приводит к росту сопротивления и соответственно снижению производительности фильтра. Современные тонковолокнистые фильтры обеспечивают высокую эффективность улавливания (до 99 % и более)

аэрозольных частиц размером до 0,3 мкм (наиболее проникающие частицы) при скоростях потока, как правило, не превышающих 0,1 м/с.

Производительность и эффективность улавливания субмикронных аэрозольных частиц может быть повышена путем применения электретных фильтров [6–9], а также электростатических фильтров различных типов, в том числе поляризационных, с использованием полимерных волокнистых материалов, помещенных в электростатическое поле [10–12]. В этих фильтрах доминирующим механизмом улавливания частиц является осаждение частиц на волокнах фильтров за счет электрических сил. При фильтрации незаряженных аэрозолей зависимости эффективности улавливания частиц от скорости потока и диаметра волокон аналогичны таким же для обычных волокнистых фильтрующих материалов, однако в случае фильтрации заряженных частиц при их относительно высокой степени зарядки проявляется эффект роста эффективности улавливания, даже при повышении скорости потока.

В 1989–1990 гг. в НИИ порошковой металлургии (ныне ГНУ «Институт порошковой металлургии» НАН Беларуси) был разработан высокопроизводительный многозонный электростатический фильтр для очистки воздуха от ультрадисперсных аэрозолей. Фильтр состоял из блока игольчатых коронирующих электродов (зона зарядки) и поляризационного фильтра на основе высокопористых металлических электродов и полимерных фильтрующих материалов (зона осаждения) [13]. Проведенные в НИИ порошковой металлургии, а также на оборудовании для исследования аэрозолей в Тартуском государственном университете (г. Тарту, Эстония) и Ленинградском институте авиационного приборостроения (ЛИАП) (Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Россия) экспериментальные исследования пилотной модели двухзонного аэрозольного электростатического фильтра (рис. 1) выявили тенденцию роста эффективности фильтрации различных аэрозолей при повышении скорости потока.

В качестве электродов фильтра использовались высокопористые ячеистые материалы (ВПЯМ) на основе никеля с открытой пористостью 97 % с размером ячейки 0,8–1,0 мм. Меж-

ду ними располагался полимерный фильтрующий материал, в качестве которого применяли открытоячеистый пенополиуретан (ППУ) с приблизительным размером ячейки 0,7–1,0 мм, диаметром перемычки (тяжа) $d_f = 60–100$ мкм и пористостью 98 %. Характерной особенностью ВПЯМ и ППУ является регулярная ячеистая структура, образованная четырьмя сходящимися под углом 120° в узлах ячеек тяжами, которые можно сравнить с волокнами волокнистого фильтра. В [14] на примере ячеистого фильтра для очистки выхлопных газов дизельного двигателя показано совпадение характера зависимостей эффективности фильтрации от структурных параметров материала с волокнистыми фильтрами.

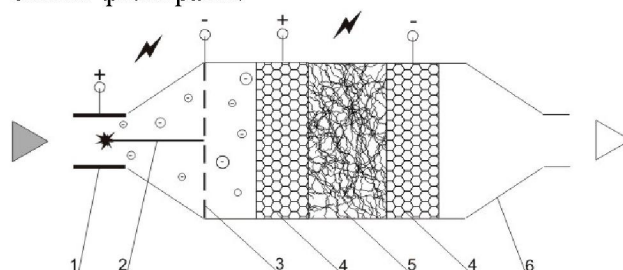


Рис. 1. Схема модели двухзонного аэрозольного электростатического фильтра: 1 – цилиндрический электрод; 2 – игольчатый коронирующий электрод; 3 – сетка-держатель коронирующего электрода; 4 – высокопористые проникаемые металлические электроды; 5 – фильтрующий полимерный материал; 6 – корпус

ППУ в качестве фильтрующего материала был выбран для достижения максимальной производительности фильтра при заданной тонкости очистки.

Механизмы осаждения аэрозольных частиц на отдельном волокне и в общем объеме волокнистого фильтра при обычных условиях достаточно хорошо изучены и описаны во многих работах (например, [1–5]). Эффективность фильтра определяется из основного уравнения фильтрации

$$\eta = 1 - \exp(-f\eta_f), \quad (1)$$

где η_f – суммарный коэффициент захвата аэрозольных частиц единичным волокном; f – параметр фильтрации, $f = 4\alpha z/\pi d_f(1 - \alpha)$; α – плотность упаковки фильтрующего материала; z – толщина фильтрующего материала.

Эффективность осаждения частиц в волокнистом фильтре η является функцией многих па-

раметров: радиуса r_p и плотности ρ_p улавливаемых частиц, скорости v , вязкости, температуры T и давления p воздуха, наличия внешних сил F , параметров фильтров (толщины z , плотности упаковки α , среднего диаметра волокна d_f и их дисперсии σ , параметра ϵ , характеризующего внутреннюю структуру фильтра) [15]:

$$\eta = \eta(r_p, \rho_p, v, \mu, T, p, F, z, \alpha, \sigma, \epsilon). \quad (2)$$

Кроме того, эффективность осаждения зависит от формы частиц, их электрического заряда q и диэлектрической проницаемости, а также от наличия зарядов на волокнах, диэлектрической проницаемости и формы сечения волокон. Для нестационарного процесса фильтрации при накоплении осадка на волокнах эффективность осаждения зависит также от количества осевших частиц и пористости осадка β .

В общем случае суммарный коэффициент захвата аэрозольных частиц единичным волокном с учетом всех действующих механизмов определяется как:

$$\eta_f = \eta_R + \eta_D + \eta_{DR} + \eta_I + \eta_E; \quad (3)$$

$$\eta_D = 2,7\text{Pe}^{-2/3} \{1 + 0,55(k_1)^{-1/3}\text{Pe}^{1/3}\text{Kn}\};$$

$$\eta_R = (2k_1)^{-1} \{(1+R)^{-1} - (1+R) + 2(1+R) \times \\ \times \ln(1+R) + 2,86\text{Kn}(2+R)R(1+R)^{-1}\};$$

$$\eta_{DR} = 1,24(k_1)^{-1/2}\text{Pe}^{-1/2}R^{2/3};$$

$$k_1 = -0,5\ln\alpha - 0,52 + 0,64\alpha + 1,43(1-\alpha)\text{Kn};$$

$$\eta_I = \text{St}^2/(\text{St}^3 + 0,77\text{St}^2 + 0,22);$$

$$\eta_E = 4F_E/3\pi\mu d_p v,$$

где η_D , η_R – коэффициенты захвата, обусловленные диффузионным осаждением частиц и зацеплением соответственно; η_{DR} – интерференционный член, свидетельствующий о неаддитивности этих двух механизмов осаждения; η_I – коэффициент захвата под действием инерции; η_E – коэффициент захвата под действием электрических сил; μ – динамическая вязкость газовой среды; ρ – плотность среды; $\text{Kn} = \lambda/r_f$ – число Кнудсена; λ – средняя длина свободного пробега молекул воздуха; $\text{Pe} = 2r_f v/D$ – диффузионный параметр Пекле; D – коэффициент диффузии частиц; $R = r_p/r_f$ – параметр зацепления; $\text{St} = 2C(\text{Kn})r_p^2\rho v/9\mu r_f$ – инер-

ционный параметр Стокса; $C(\text{Kn})$ – поправка Каннингема на скольжение газа; $d_f(r_f)$ – диаметр (радиус) волокон, $d_p(r_p)$ – диаметр (радиус) частиц; $F_E = Qq/\pi\epsilon_0 d_f$ – сила электрического взаимодействия, когда волокна и частицы заряжены [18]; $F_E = [(\epsilon_f - 1)/(\epsilon_f + 1)][q^2/4\pi\epsilon_0 \times (2r^*/d_f - 1)^2 d_f^2]$ – сила электрического взаимодействия, когда волокна нейтральны, а частицы заряжены, $F_E = [(\epsilon_p - 1)/(\epsilon_p + 2)](Q^2 d_p^3/\pi\epsilon_0 d_f^3)$ – сила электрического взаимодействия, когда волокна заряжены, а частицы нейтральны; Q , q – заряд волокна и частицы; ϵ_0 – электрическая постоянная (для воздуха $8,85 \cdot 10^{-12}$ Кл²/(Н·м²)); ϵ_f , ϵ_p – относительная диэлектрическая проницаемость волокон и частиц; r^* – расстояние между частицей и волокном.

В [18] приводится аппроксимационная зависимость для η_E , связывающая инерционный параметр с безразмерным параметром заряда при $0,5 < \text{Re} < 50$:

$$\eta_E = 1,22(2 - \ln \text{Re}) N_{Qq} / \left[\left(\text{St} / 2\sqrt{\text{Re}} \right)^{1,5} + 1 \right], \quad (4)$$

где $N_{Qq} = Qq/3\pi^2\epsilon_0\mu d_f d_p v$ – безразмерный параметр заряда для случая заряженных частиц и волокон; $\text{Re} = d_f \rho v/\mu$ – число Рейнольдса.

Для заряженных частиц размером менее 0,5 мкм и скорости потока более 0,1 м/с доминирующим механизмом осаждения частиц на единичном нейтральном или заряженном волокне является осаждение под действием электрической силы (кулоновского взаимодействия). Вклад остальных механизмов в области субмикронных аэрозолей при высоких скоростях гораздо менее значителен. Но для частиц размером более 1 мкм с повышением скорости потока существенно возрастает роль инерционного механизма осаждения.

На рис. 2 приведена модель осаждения заряженных частиц на единичном волокне, поляризованном в электростатическом поле, при ламинарном и турбулентном режимах обтекания. В данном случае волокно представляет собой диполь, ориентированный в соответствии с направлением силовых линий поля. В процессе движения отрицательно заряженная аэрозольная частица отталкивается от передней одноименно заряженной поверхности волокна и притягивается к противоположно заряженной задней поверхности.

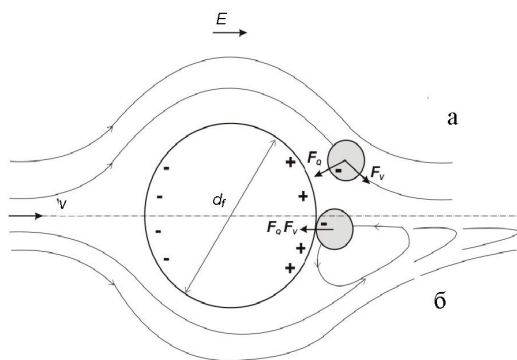


Рис. 2. Модель осаждения заряженных частиц на поляризованном в электростатическом поле E на единичном волокне: а – ламинарный режим обтекания; б – турбулентный режим обтекания; F_Q – сила кулоновского притяжения; F_v – движущая сила; v – скорость потока

При ламинарном обтекании потоком среды волокна возможность осаждения частицы будет зависеть от величины ее заряда и соответственно силы кулоновского взаимодействия F_Q , а также от скорости потока и движущей силы F_v . Направления действия сил не совпадают (рис. 2а). С некоторым возрастанием скорости (в пределах ламинарного и переходного режимов обтекания) условия осаждения под действием электрических сил будут ухудшаться. Но будет возрастать значение инерционного механизма осаждения.

При турбулентном обтекании потоком среды волокна, когда за волокном образуется зона циркуляции, условия осаждения частицы улучшаются, поскольку направления действия сил при приближении частицы к волокну благодаря циркуляции вихрей у его поверхности совпадают (рис. 2б). Таким образом, с ростом скорости условия осаждения улучшаются, но до определенного предела, когда при дальнейшем повышении скорости зона циркуляции растягивается и затем отрывается от поверхности волокна.

При противоположной поляризации волокна, когда на его передней поверхности сосредоточены положительные заряды, создаются благоприятные условия для осаждения частиц на передней поверхности за счет кулоновской силы и эффекта инерции. Однако при повышении скорости потока и возрастании движущей силы F_v эффективность улавливания снижается из-за уноса частиц. Этот случай аналогичен осаждению незаряженных частиц на незаряженных волокнах, но со значительно большей эффективностью улавливания за счет действия кулоновских сил. На обратной стороне волокна

осаждение не происходит. Теоретически наиболее благоприятные условия улавливания заряженных аэрозольных частиц создаются при фильтрации через слой униполярно заряженных волокон. Отрицательно заряженная частица может притягиваться ко всей поверхности положительно заряженного волокна. Подобный вариант реализуется в электретенных фильтрах. Однако практически достичь высокого по сравнению с поляризованными в электростатическом поле волокнами уровня заряда не представляется возможным. Кроме того, такой заряд не стабилен и со временем в процессе фильтрации снижается вплоть до полного исчезновения.

Реальная картина обтекания потоком единичного цилиндра подтверждает вывод о влиянии турбулентности на повышение эффективности осаждения. Фото 1–4 иллюстрируют процесс обтекания одиночного цилиндра при различных скоростях потока (разных числах Рейнольдса) [16].

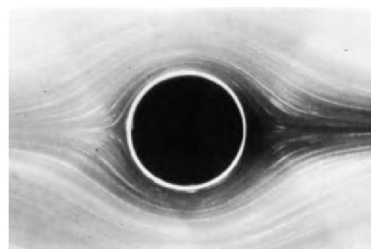


Фото 1. Обтекание кругового цилиндра однородным потоком при $Re = 0,16$. Поток движется слева направо. Для визуализации течения воды применен алюминиевый порошок

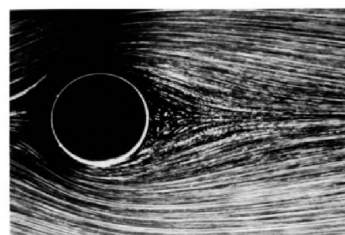


Фото 2. Обтекание кругового цилиндра при $Re = 9,6$



Фото 3. Обтекание кругового цилиндра при $Re = 13,1$

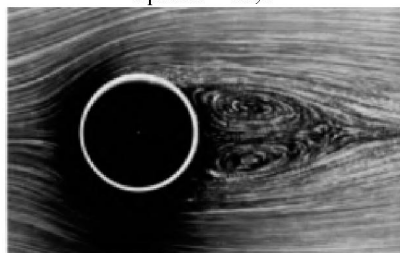


Фото 4. Обтекание кругового цилиндра при $Re = 26$

С увеличением числа Рейнольдса поток становится несимметричным, происходит отрыв потока за обтекаемым телом с последующим образованием рециркуляционных вихрей и их вытягиванием в направлении потока. Видно, что их длина линейно растет с увеличением числа Рейнольдса до тех пор, пока течение не становится неустойчивым при значении Re , превышающем 40. Расстояние вдоль потока до центров вихрей также линейно возрастает с ростом Re .

Численные исследования двумерной модели обтекания препятствия воздушным потоком приведены в [17]. Исследованы характеристики обтекания препятствий диаметром D_{ob} , равным 100, 200, 500 и 1250 мкм, в границах режимов, определяемых по числу Рейнольдса для препятствия Re_{ob} : от 0,1 (вязкий) до 1000 (переходный к потенциальному). Плотность воздуха $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$, коэффициент динамической вязкости $\mu = 17,894 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$. На фото 5 представлено сравнение результатов опытов по М. Ван-Дайку [1] и численного исследования обтекания препятствий с диаметрами D_{ob} соответственно 0,5 дюйма и 500 мкм при одинаковом режиме с $Re_{ob} = 26$.

Наблюдаются совпадение опытных и расчетных линий тока перед препятствием, хорошее качественное и количественное соответствие контура рециркуляционной зоны. Опытные и расчетные относительные расстояния по потоку до центров вихрей, рассматриваемые М. Ван-Дайком как характерные для режимов обтекания в пределах $5 < Re_{ob} < 26$, различаются менее чем на 5 %. Таким образом, расчетным путем подтверждено наличие зоны рециркуляции.

Процесс осаждения аэрозольных частиц на обратной по отношению к направлению потока среды стороне волокон описан в [18].

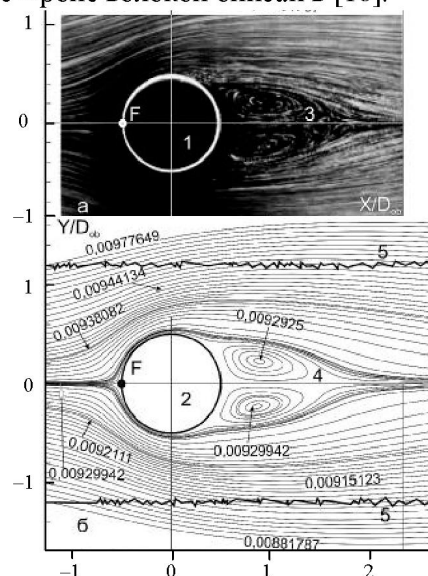
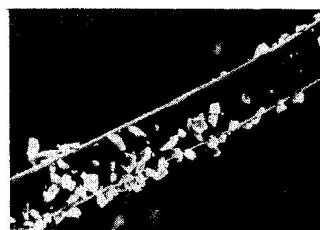
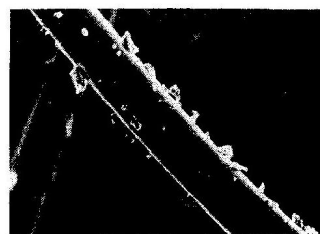


Фото 5. Обтекание круглого цилиндра в натурном эксперименте по [16] (а) и по результатам численного эксперимента [17] (б): 1, 2 – модели препятствия диаметром 0,5 дюйма и 500 мкм; 3, 4 – зоны рециркуляции; 5 – границы зоны трехкратной адаптации расчетной области в численном эксперименте

В [19] также показано, что при высоких скоростях потока ($Re = 3750$) осаждение аэрозольных частиц размером более 0,5 мкм происходит на обратной стороне волокон (фото 6).



$Re_R = 3750$



$Re_R = 1000$

Фото 6. Осаждение частиц кварца на волокнах при различных числах Рейнольдса. Поток движется сверху вниз. Размер волокон полиэстера $d_f = 17,4 \text{ мкм}$

На рис. 3–5 приведены результаты экспериментальных исследований модели двухзонного аэрозольного электростатического фильтра при фильтрации аэрозоли диоктилфталата (DOP) и естественной пыли в помещении. Исследования проводились при объемных расходах $Q = 3$ л/мин и $Q = 15$ л/мин, что соответствовало скоростям потока в фильтре $v = 0,07$ м/с и $v = 0,35$ м/с. Было принято, что чем выше ток коронного разряда, тем больше величина заряда частиц, приобретаемого ими при прохождении зоны зарядки (ионизации).

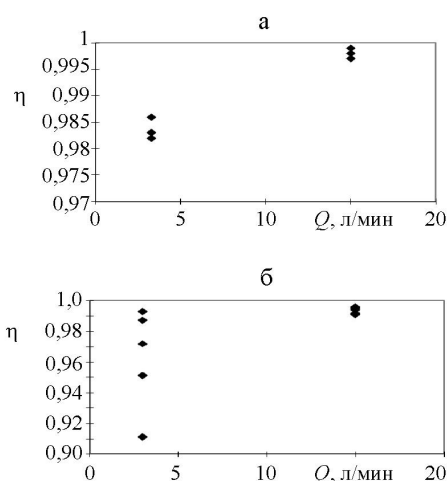


Рис. 3. Зависимость эффективности улавливания частиц от скорости фильтрации: а – аэрозоль DOP; б – пыль в помещении, $I_c = 50$ мкА

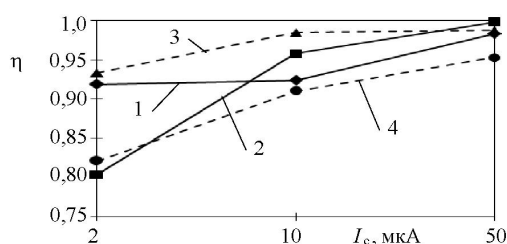


Рис. 4. Зависимость эффективности улавливания частиц от величины тока короны при различных скоростях фильтрации: 1 – $Q = 3$ л/мин, DOP; 2 – 15, DOP; 3 – 15, Air; 4 – $Q = 3$ л/мин, Air

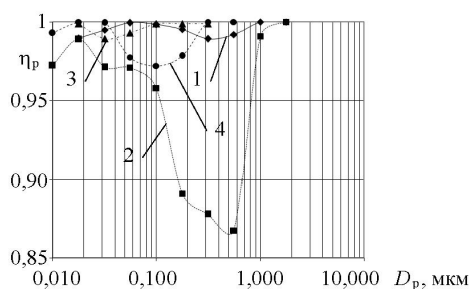


Рис. 5. Зависимость фракционной эффективности улавливания частиц от скорости потока для различных аэрозолей: $I_c = 50$ мкА; 1 – $Q = 3$ л/мин, DOP; 2 – 3, Air; 3 – 15, DOP; 4 – $Q = 15$ л/мин, Air

Результаты показывают, что эффективность фильтра η существенно возрастает с повышением скорости фильтрации и величины зарядки частиц. Фракционная η_p эффективность улавливания также повышается, при этом происходит сдвиг минимума (наиболее проникающих частиц $d_p \approx 0,3$ мкм) в сторону меньших размеров аэрозольных частиц.

Таким образом, исследования показывают, что увеличение скорости потока при определенных условиях приводит к повышению эффективности осаждения аэрозольных частиц на волокнах фильтра. Эффективность фильтрации частиц более 1 мкм с увеличением скорости фильтрации возрастает за счет повышения роли инерционного механизма осаждения частиц на передней и частично на обратной поверхности волокон, а при действии электрических сил – на их обратной стороне. Эффективность фильтрации частиц менее 1 мкм с увеличением скорости фильтрации возрастает в случае, когда частицы и волокна заряжены. Турбулизация потока и возникновение циркуляционных вихрей в кормовой области волокон создает благоприятные условия для осаждения частиц на их обратной стороне за счет турбулентной диффузии и совпадения направления действия движущей силы потока и силы кулоновского взаимодействия заряженных частиц и заряженных (поляризованных в электрическом поле) волокон. В результате появляется возможность существенно повысить производительность фильтрации, а также общую и фракционную эффективность улавливания аэрозольных частиц и, что особенно важно, в области наиболее проникающих частиц размером 0,3 мкм. При этом в качестве фильтрующего материала могут использоваться относительно крупные волокна в диапазоне 30–100 мкм и высокопористые ячеистые материалы с аналогичными по размеру перемычками-тяжами, что значительно дешевле и технически проще по сравнению с наноразмерными волокнами, получение которых еще до конца не освоено.

На основании проведенных исследований в ГНУ «Институт порошковой металлургии» был

разработан экспериментальный образец двухзонного аэрозольного электростатического фильтра, включающего зону зарядки в поле коронного разряда и зону осаждения, выполненную в виде поляризационного фильтра [13, 20]. Экспериментальный образец продемонстрировал высокую общую эффективность фильтрации пиролизных аэрозолей поливинилхлорида (ПВХ) и полиэтилена (ПЭ), а также атмосферной пыли. При скорости фильтрации 7,5 м/с, токе коронного разряда 365 мкА и напряжении на осадительных электродах 5 кВ коэффициент проскока аэрозольных частиц составил: для ПВХ ($d_{p,ср} = 1,5$ мкм) – 1,81, для ПЭ ($d_{p,ср} = 0,7$ мкм) – 1,48, для пыли ($d_{p,ср} = 10$ мкм) – 0,82.

ВЫВОД

Теоретически и экспериментально исследованы основные закономерности процесса очистки воздуха от ультрадисперсных аэрозолей

в условиях действия электрических сил при различных скоростях потока. Показано, что эффективность фильтрации частиц размерами более 1 мкм возрастает с увеличением скорости фильтрации за счет повышения роли инерционного механизма осаждения частиц на передней и частично на обратной поверхности волокон, а при действии электрических сил – на их обратной стороне. Эффективность фильтрации частиц размерами менее 1 мкм возрастает с увеличением скорости фильтрации, когда частицы и волокна обладают электрическим зарядом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кирш, А. А. Эффективность аэрозольных фильтров, состоящих из ультратонких полидисперсных волокон / А. А. Кирш, И. Б. Стечкина, Н. А. Фукс // Коллоидный журнал. – 1975. – № 1. – С. 41–46.
2. Lee, K. W. Experimental Study of Aerosol Filtration by Fibrous Filters / K. W. Lee, B. Y. Liu // H. Aerosol Science and Technology. – 1981. – Vol. 11. – P. 35–46.
3. Мазус, М. Г. Фильтры для улавливания промышленных пылей / М. Г. Мазус, А. Д. Мальгин, М. Л. Моргулис. – М.: Машиностроение, 1985. – 240 с.
4. Балтренас, П. Б. Обеспыливание воздуха на предприятиях стройматериалов / П. Б. Балтренас. – М.: Стройиздат, 1990. – 184 с.
5. Löffler, F. Die Abscheidung von Partikeln aus Gasen in Faserfiltern / F. Löffler // Chem.-Ing.-Tech. – 1980. – Vol. 52, No. 4. – S. 312–323.
6. Мяздриков, О. А. Электреты / О. А. Мяздриков, В. Е. Манойлов. – М.; Л.: Госкомэнергоиздат, 1962. – 99 с.
7. Губкин, А. Н. Электреты / А. Н. Губкин. – М.: Наука, 1978. – 192 с.
8. Электреты: пер. с англ.; под ред. Г. Сесслера. – М.: Мир, 1983. – 487 с.
9. Ерашкин, Г. В. Модель электрета с дискретным поверхностным зарядом / Г. В. Ерашкин // Электротехника. – 1985. – № 7. – С. 52–54.
10. Shaddon, R. W. L. Electrically enhanced collection of reparable aerosols in granular bed filters at low Reynolds number / R. W. L. Shaddon // IEEE Trans. Ind. appl. – 1985. – V. 21, No. 2. – P. 501–506.
11. Wang, C. Dust collection by particle inertia and electrical forces/ C. Wang, HOC // Powder Techn. Pap. Int. Symp. – Kyoto, 1981. – P. 565–572.
12. Двухименный, В. А. Системы очистки воздуха от аэрозольных частиц на АЭС / В. А. Двухименный, Б. М. Столяров, С. С. Черный. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 88 с.
13. Разработка пористых порошковых материалов и изделий из них экологического назначения // А. Н. Сорокина [и др.] // Достижения науки и техники в области ресурсосбережения и экологии: тез. докл. междунар. конф. – Гомель, 1989. – С. 61–62.
14. Pontikakis, G. N. Dynamic Filtration Modeling In Foam Filters For Diesel Exhaust / G. N. Pontikakis, G. C. Koltzakis, A. M. Stamatelos // Chem. Eng. Comm. – 2001. – Vol. 10. – P. 1–26.
15. Кирш, А. А. Фильтрация аэрозолей волокнистыми материалами ФП / А. А. Кирш, А. К. Будыка, В. А. Кирш // Российский химический журнал. – 2008. – Т. LII. – № 5.
16. Альбом течений жидкости и газа: пер. с англ.; сост. М. Ван-Дайк. – М.: Мир, 1986. – 184 с.
17. Зиганшин, М. Г. Полуэмпирическая модель образования автослоя на тканых фильтрационных материалах. – Ч. 1. Исследование взаимодействия взвешенных частиц и препятствия в потоке / М. Г. Зиганшин, А. М. Зиганшин // Известия КазГАСУ. – 2009. – № 1 (11). – С. 181–185.
18. Muhr, W. Theoretische und experimentelle untersuchung der partikelabscheidung in faserfiltern durch feld- und trägheitskräfte. Dissertation / W. Muhr. – Universität Karlsruhe, 1976. – S. 145–153.
19. Jodeit, H. Untersuchungen zur Partikelabscheidung in technischen Tiefenfiltern / H. Jodeit // Fortschr.-Ber. VDI Reihe 3. – No. 108. – Düsseldorf: VDI-Verlag, 1985. – S. 378–383.
20. Пористые материалы и устройства на их основе для очистки воздуха от пылегазовых выбросов, сварочных и других ультрадисперсных аэрозолей / М. В. Тумилович [и др.] // Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка: материалы 8-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 27–28 мая 2008 г. / Ин-т порошковой металлургии ГНПО ПМ НАН Беларуси; редкол.: А. Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск, 2008. – С. 104–105.

Поступила 10.02.2010